

УДК 621.363 + 06

ОПТИМИЗАЦИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ НЕЛДЕРА–МИДА

Петрушин Александр Дмитриевич¹,
alex331685@yandex.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна¹,
nastya3051990@mail.ru

Кашуба Александр Викторович¹,
kashuba-av@mail.ru

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения,
Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2.

Актуальность работы обусловлена важными практическими задачами для нефтедобывающей промышленности, такими как повышение эффективности процесса добычи нефти, надежности работы оборудования и снижение затрат на эксплуатацию. В связи с этим в статье рассмотрены вопросы оптимизации активной части вентильно-индукторного двигателя, обладающего рядом преимуществ по отношению к применяемым асинхронным двигателям и синхронным с постоянными магнитами в нефтедобывающей отрасли. Основными преимуществами вентильно-индукторного двигателя являются энергоэффективность и надежность в эксплуатации. Для дальнейшего совершенствования его удельных показателей и экономической эффективности применен метод Нелдера–Мида, позволяющий в заданных габаритах увеличить электромагнитный момент двигателя за счет оптимизации геометрии его активной части. Это важно для погружного насоса, имеющего жесткие габаритные ограничения. При большой кривизне скважины в случае наклонного бурения применение данного типа двигателя позволяет в полной мере реализовать его преимущества.

Цель работы: анализ основных методов проектирования вентильно-индукторного привода и оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя с целью увеличения среднего значения электромагнитного момента.

Методы исследования. Расчеты магнитного поля проводились методом конечных элементов, заложенных в основу программы по расчету и визуализации электромагнитных процессов FEMM 4.2; площадь под кривой электромагнитного момента вычислялась численным интегрированием этой кривой методом трапеций; использовался детерминированный метод Нелдера–Мида (деформируемого многогранника), который относится к методам безусловной оптимизации функции от нескольких переменных и не использует производной (градиентов) функции.

Результаты. Проведен анализ основных методик проектирования вентильно-индукторного привода. Разработана программа автоматизированного проектирования вентильно-индукторного двигателя в среде MATLAB, с помощью которой формируются геометрические данные зубцовой зоны двигателя. Расчет магнитного поля выполнен в программе FEMM 4.2. Реализован оптимизационный алгоритм расчета среднего значения электромагнитного момента, основанный на методе Нелдера–Мида (деформируемого многогранника) и позволяющий существенно улучшить характеристики вентильно-индукторного двигателя.

Ключевые слова:

Вентильно-индукторный двигатель, проектирование, статор, ротор, зубцовая зона, электромагнитный момент, оптимизация, метод Нелдера–Мида.

Нефтедобывающая промышленность играет существенную роль в экономике России. Одной из ее составляющих является непосредственное извлечение нефти из скважины, которая представляет собой сложный производственный процесс с использованием высокотехнологичного оборудования. Нефтяные ресурсы относятся к невозобновляемым, и поэтому важной задачей, стоящей перед нефтяными компаниями, является более рациональное использование месторождений. Эффективность эксплуатации на всех этапах процесса должна быть высокой. Добыча нефти осуществляется посредством электротехнических комплексов, в которые входят насосные установки с электроприводами вращательного или возвратно-поступательного движения. Задача повышения эффективности нефтедобычи может быть решена благодаря использованию автоматизированного электропривода на основе простых по конструк-

ции и надежных вентильно-индукторных двигателей (ВИД), получивших в англоязычной литературе название Switched Reluctance Motor (SRM).

Преимущества автоматизированного привода очевидны: наличие управляемого преобразователя позволяет формировать динамические характеристики рабочего органа машин и регулировать параметры в изменяющихся внутрискважинных жестких условиях эксплуатации; значительно повысить технико-экономические показатели и функциональные возможности технологического процесса.

Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) – это относительно новый, но вызывающий большой интерес тип регулируемого привода. Основным элементом ВИП является ВИД, который за счет своих преимуществ в ближайшем будущем составит серьезную конкуренцию традиционным типам двигателей практически во всех отраслях

промышленности, в том числе и нефтедобывающей. В настоящее же время для погружных насосов наибольшее распространение получили вентильные двигатели с постоянными магнитами [1, 2] и асинхронные [3].

ВИП довольно широко применяется за рубежом в промышленном производстве. В России также имеются внедрённые разработки ВИП, в том числе большой мощности (свыше 500 кВт) [4, 5]. В современных условиях, в которых находится производство в России, существует проблема с поставками высокотехнологичной импортной продукции во всех сферах промышленности и транспорта. Несмотря на достигнутые положительные результаты, нашей стране необходимо и дальше совершенствовать собственную научную и производственную базу автоматизированного электропривода. В России производство ВИП с каждым годом растёт, и есть ряд предприятий, которые специализируются именно на создании этого типа электропривода: ООО «НПП "Эметрон"», ООО «ВИЭМ», ООО «МИП "Мехатроника"» ЮРГПУ (НПИ), ЗАО «НТЦ "Привод-Н"», АО «Каскод», ООО «Сапфир», ОАО «Т-Гидропресс», а также НПП «Цикл+», ООО «НПФ "ВЕКТОР"», сотрудничающие с НИУ МЭИ. Среди производителей погружных ВИД можно выделить следующие компании: ООО «Борец», ООО «Новомет» и ООО «ЭПУ-ИТЦ».

Конструкция ВИД проста и технологична. Статор и ротор имеют явно выраженные полюса. Обмотка находится только на статоре. Благодаря отсутствию узлов, требующих постоянного обслуживания, упрощается эксплуатация и повышается надёжность электропривода в целом, а за счёт интегрального исполнения привода – улучшаются массогабаритные показатели машины, что имеет важное значение для добычи нефти в скважинах с большой кривизной. При этом КПД ВИД в области частот вращения 1500–4000 мин⁻¹ на 2–4 % больше, чем у АД [2]. Важным критерием при выборе электродвигателя для насосной установки является начальный момент двигателя и насоса в период пуска и освоения скважины. ВИД может работать как на сверхнизких, так и на сверхвысоких частотах вращения.

У ВИД есть и недостатки, основными из которых являются повышенный уровень вибрации и шума, а также значительные пульсации электромагнитного момента. Благодаря работам ученых и инженеров [6–11], эти недостатки постепенно устраняются.

Как известно, одним из основных этапов создания высокоэффективного двигателя является его проектирование. И этот этап для ВИД требует дальнейшего совершенствования.

Для проектирования традиционных типов машин используются общеизвестные и апробированные методики проектирования [12, 13], однако для ВИД они не пригодны по нескольким причинам. Одной из причин является то, что при работе ВИД в

любом режиме, даже номинальном с установившейся частотой вращения, имеют место непрерывные переходные процессы, которые связаны с коммутацией фаз. Токи и напряжения при этом существенно отличаются от синусоиды. Второй причиной является наличие явно выраженной зубчатости активной части двигателя с довольно малым воздушным зазором между зубцами статора и ротора. Такая конструкция ведет к локальному насыщению коронок зубцов, которое начинает проявляться, когда зубцы статора и ротора перекрываются, что оказывает влияние на гармонический состав токов и момента. Помимо этого, магнитная индукция в воздушном зазоре, сильно зависящая от положения ротора, и ток статора имеют резко несинусоидальный характер, что делает расчет параметров и характеристик двигателя более сложным.

К настоящему времени проведено немало теоретических и практических исследований по созданию ВИД с наилучшими энергетическими и технико-экономическими показателями, и ученые добились значительных результатов в этой области [14–20].

Появились ориентированные на ВИД методики проектирования, но они существуют в общем виде и требуют значительных корректировок в зависимости от конкретного технического задания на разработку. В частности, остается открытым вопрос о влиянии соотношения геометрических размеров на показатели привода в целом. Например, в работе [18] проводится оптимизация геометрии двигателя по ряду критериев: минимума суммарного объема; минимума массы активных частей; максимума быстродействия. Рассмотрим некоторые из методик проектирования и проведем их анализ.

Базой для всех методик проектирования являются три основных подхода [21, 22]: энергетический, полевой и подход на основе расчета переходного процесса. На практике же зачастую эти подходы используют комбинированно. Общей основой для всех методик служит определение главных размеров, которые рассчитываются исходя из «машинной постоянной» с учетом свойств используемых материалов для активной части машины. Процесс проектирования обладает цикличностью, т. е. дойдя до определенного этапа расчета, необходимо сравнить полученный результат с некоторым контрольным значением. Промежуточными контрольными значениями могут служить следующие: соотношение максимальной ширины паза ротора и ширины зуба статора: $b_{pr_max} > b_{zs}$; соотношение минимальной ширины паза статора и ширины зуба ротора: $b_{ns_min} > b_{zs}$; ограничения по действующему значению тока катушки; максимальное значение индукции в зубце статора и коэффициент заполнения паза медью.

Энергетический подход лежит в основе методики, опубликованных в [15–19]. Суть этого метода заключается в анализе баланса магнитной, элек-

трической и механической энергии одной фазы двигателя на цикле коммутации. Расчет производится посредством энергетических диаграмм, представляющих собой зависимость потокоцепления от тока интервала коммутации одной фазы. Проводится анализ траектории, отображающей точки в данных координатах. Форма кривой полностью зависит от степени насыщения магнитной системы. С помощью таких диаграмм определяются разные интегральные величины, например средний электромагнитный момент или эффективность преобразования энергии в двигателе ($W_{эф}$) [20]:

$$W_{эф} = \frac{W_k}{W_k + W_{магн}}, \quad (1)$$

где W_k – коэнергия (часть энергии магнитного поля, которая расходуется на совершение механической работы) [14, 20]; $W_{магн}$ – энергии магнитного поля.

Для расчета, при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания, в научных трудах [15] используется метод двойной энергии на основе четырехсторонней дискретизации сегментированной области.

Исходными данными практически во всех методиках проектирования являются: номинальная мощность P_n , кВт; номинальное напряжение U_n , В, и частота вращения $n_{ном}$, с⁻¹. В [19] также исходным является и номинальный КПД η_n , а в [18] проектирование базируется на требуемой мощности и частоте вращения. Но в каждом конкретном случае техническое задание может содержать также ограничения, специальные требования (например, к массогабаритным показателям) и дополнительные рекомендации (например, число фаз, число полюсов статора и ротора и т. д.).

В основном главные размеры рассчитываются исходя из уравнения машинной постоянной для ВИД [12]:

$$C_A = \frac{D^2 l_{\delta} \omega_{ном}}{P_n} = \frac{1270}{k_i \eta_n B_{\delta max} A}, \quad (2)$$

где P_n – номинальная мощность, Вт; $k_i=0,75...0,85$ – коэффициент, который зависит от формы кривой фазного тока; η_n – номинальный КПД; $\omega_{ном}$ – номинальная угловая частота вращения, с⁻¹; $B_{\delta max}$ – значение максимальной индукции воздушного зазора, Тл; A – линейная электрическая нагрузка, А/м.

Точность определения главных размеров будет зависеть напрямую от накопленного опыта проектирования и эксплуатации, так как значения величин A , k_i и $B_{\delta max}$ основываются на эмпирических данных. Чтобы наиболее точно определить оптимальное соотношение диаметров статора и ротора, авторы [18, 19] в этом случае предлагают пользоваться величиной удельного момента (отношение электромагнитного момента к объему ротора). Далее следует определение и корректировка электромагнитных нагрузок исходя из предыдущего пункта. Следующим этапом является выбор числа фаз,

конфигурации и размеров зубцовой зоны, что напрямую зависит от условий эксплуатации проектируемого двигателя. Внешний и внутренний диаметр статора определяется соотношением: $D_s=(1,54...2,2)D$.

Непосредственно расчет зубцовой зоны связан с выбором угловых размеров полюсов β_s и β_r . Некоторые рекомендации по их выбору можно получить в источнике [5], а влияние отдельных конфигураций зубцовой зоны на значение среднего момента – в [15, 18]. Как утверждает автор [19], диаметр вала должен быть максимально возможным для улучшения виброакустических характеристик. Приближенная формула для определения первой критической скорости:

$$n_{кр} = 3,67 \cdot 10^5 \frac{d_0}{l_B \sqrt{G l_B}}, \text{ мин}^{-1}, \quad (3)$$

где d_0 – диаметр вала, см; l_B – длина вала между подшипниками, см; G – масса ротора, г. При этом значение критической скорости должно быть в несколько раз выше частоты вращения двигателя.

Последним этапом является определение обмоточных данных катушки, что, как правило, осуществляется итерационно. Необходимо, чтобы соотношение между амплитудой тока и числом витков катушки F [19] удовлетворяло бы двум условиям: возможность размещения катушки в пазу статора и допустимая плотность тока. После определения обмоточных данных рассчитывается активное сопротивление катушки. В работе [18] последним этапом является исследование характеристик привода на скоростях выше номинальной.

Полевой подход к проектированию наиболее подробно изложен в [14]. Основным преимуществом этого метода является учет нелинейности свойств материалов, вращения и локального насыщения. Заключается он в последовательном расчете магнитного поля активных частей двигателя с последующим расчетом локальных и интегральных величин. Как предлагает автор [14], моделирование магнитного поля ВИД лучше проводить с использованием программ ELCUT и ANSYS, но также есть и более доступная программа по расчету электромагнитных полей – FEMM, ранние версии которой находятся в свободном доступе. FEMM – это пакет программ для решения низкочастотных электромагнитных задач для плоских двумерных и осесимметричных объектов методом конечных элементов. В настоящее время программа может использоваться для решения как линейных, так нелинейных задач постоянного и переменного магнитного поля, а также для решения линейных задач электростатического поля и задач стационарного теплового потока.

Перед началом моделирования магнитного поля ВИД задаются геометрические размеры активной части и свойства всех блоков, из которых состоит ВИД. Далее формируются начальные и граничные условия. В программе FEMM наиболее рас-

пространенными являются границы типа: Дирихле (границы, к которым магнитный поток параллелен) и Неймана (границы, к которым магнитный поток перпендикулярен). Далее задача определения основных характеристик магнитного поля решается с помощью метода конечных элементов. В итоге можно получить расчет электромагнитных сил, моментов и графики распределения основных величин магнитного поля.

В работе [14] описывается алгоритм проектирования ВИД с применением программного комплекса ELCUT. Автор предлагает главными критериями для оценки эффективности работы двигателя рассматривать: удельное окружное усилие σ и коэффициент преобразования момента k_T . Проектирование с учетом значения σ позволит выбрать наиболее оптимальный диаметр расточки статора, что в свою очередь создаст наибольший пусковой момент, коэффициент k_T учитывает эффективность преобразования энергии.

Не менее продуктивной является методика на основе расчета переходного процесса на цикле коммутации одной фазы. Подробное применение этого способа на этапе проектирования рассмотрено в [22].

Для наиболее точного конечного результата на этапе эскизного проектирования можно использовать методики с наименьшей трудоемкостью, а далее для уточнения полученных результатов использовать более точные модели, т. е. проектировать комбинированно, как, например, в [18].

Известно, что одним из самых важных показателей двигателя является вращающий электромагнитный момент. Поэтому данное исследование посвящено нахождению таких геометрических параметров активной части ВИД, при которых средний электромагнитный момент за один такт коммутации принимал бы максимальное значение. Эта задача решается с применением алгоритма, в качестве которого был выбран метод деформируемого многогранника, иначе – метод Нелдера–Мида [23].

Данный метод построен на базе симплексного метода Спендли, Хекста и Химсворта. Относится он к детерминированным методам безусловной оптимизации функции от нескольких переменных и не использует производной (градиентов) функции. Суть метода заключается в сравнении значений функции $f(x, y)$ в вершинах треугольника и дальнейшем перемещении этого симплекса в направлении оптимального значения. В процессе итерационного вычисления наихудшая вершина, в которой функция принимает наибольшее (наименьшее) значение, отбрасывается и заменяется новой вершиной. Таким образом, формируемый новый симплекс будет каждый раз уменьшаться, пока не будет найден экстремум функции. Преимущества данного метода состоят в следующем: легко применим к негладким и/или зашумленным функциям; он эффективен и компактен при вычислении; по сравнению с методами оптимизации, основанными на генерации слу-

чайных чисел, на порядок меньшее количество вычислений целевой функции [24, 25].

Главным недостатком этого метода является то, что вычисляется не глобальный, а локальный экстремум, поэтому, чтобы избежать «застоя» на предельном значении параметра, принято решение: присваивать не предельное значение параметру, а близкое к нему. Для более точного и надежного результата этот метод целесообразнее применять в сочетании со стохастическими алгоритмами.

В качестве исходного оптимизируемого объекта был выбран двигатель мощностью 4,25 кВт, технические данные которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические данные исследуемого вентильно-индукторного двигателя

Table 1. Technical data of the studied switched-reluctance motor

| Параметры/Parameters | Значение/Value |
|---|----------------|
| Число полюсов статора Number of stator poles | 6 |
| Число полюсов ротора Number of rotor poles | 4 |
| Число фаз Number of phases | 3 |
| Наружный радиус статора, мм Outer radius of stator, mm | 74,5 |
| Внутренний радиус статора (по пазам), мм Inner radius of stator (on the grooves), mm | 63,5 |
| Внутренний радиус статора (по коронке зубцов), мм Inner radius of stator (on the crown of teeth), mm | 42,2 |
| Радиус ротора (по пазам), мм Radius of rotor (on the grooves), mm | 33 |
| Радиус ротора (по коронке зубцов), мм Radius of rotor (on the crown of teeth), mm | 42 |
| Воздушный зазор, мм Air gap, mm | 0,2 |
| Радиус отверстия под вал, мм Radius of shaft holes, mm | 17,5 |

В качестве оптимизируемых были выбраны четыре переменные, изменение которых наиболее сильно влияет на величину электромагнитного момента: ширина коронки зубца ротора ($b1r$), ширина основания зубца ротора ($b2r$), ширина зубца статора ($b1s$) (в данном случае зубец прямой) и радиус статора по пазам ($R2s$) (рис. 1).

Программа разработана в среде MATLAB и осуществляет прямое взаимодействие с программой FEMM 4.2 [26]. Поперечное сечение исследуемого двигателя и распределение магнитного поля (фаза А включена) представлены на рис. 2, а.

Для того чтобы получить численные значения оптимизированных параметров магнитной системы исследуемого двигателя и значение среднего момента, необходимо сформировать исходные значения геометрии объекта и ограничения, в пределах которых будет найден экстремум целевой функции.

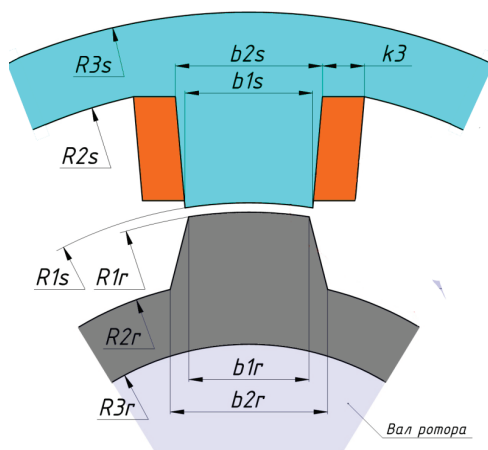


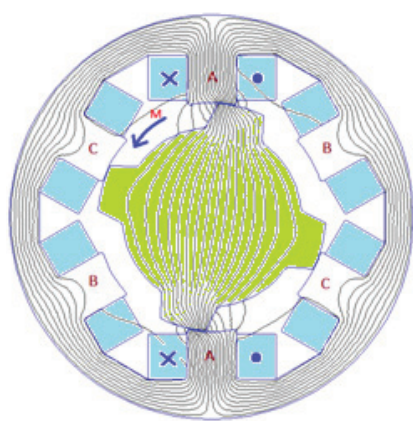
Рис. 1. Оптимизируемые параметры

Fig. 1. Optimized parameters

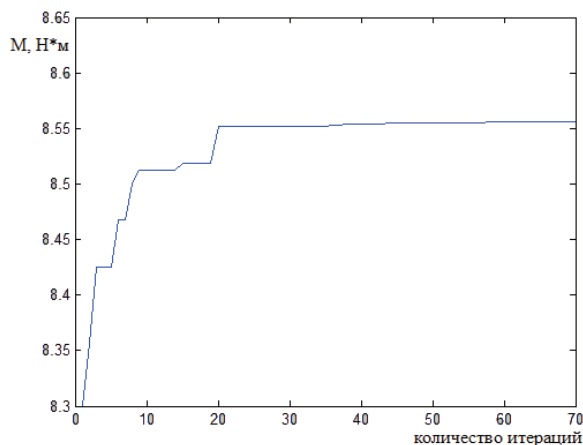
В качестве критерия оптимизации принят средний электромагнитный момент. Также необходи-

мо указать и количество итераций. После того как все необходимые значения заданы, программа вычисляет момент на валу двигателя для каждого положения ротора с определенным угловым шагом. Электромагнитный момент вычислялся через производную от коэнергии. Итогом расчетов были значения мгновенного электромагнитного момента в функции угла поворота ротора, по которым и строилась кривая момента $M=f(\Theta)$ (рис. 3, а, б). Далее проводилось численное интегрирование кривой момента с помощью метода трапеций [27]. Как видно на рис. 2, б, после каждой проведенной итерации наблюдалось увеличение значения среднего момента. Начиная примерно с двадцатой итерации процесс оптимизации практически завершен.

Используемый в программе метод Нелдера–Мида, с помощью которого решалась поставленная задача, наиболее подробно и наглядно можно представить в виде блок-схемы (рис. 4) и рис. 5, на котором изображены принципы нахождения оптимального решения.



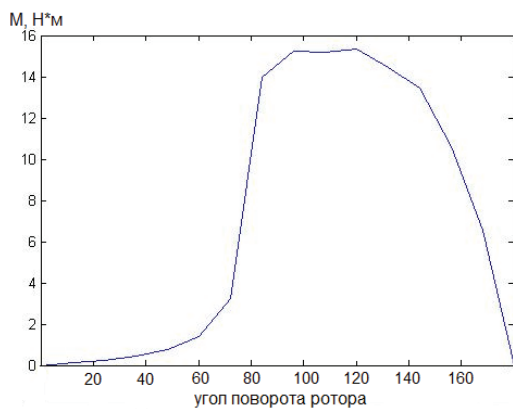
а/а



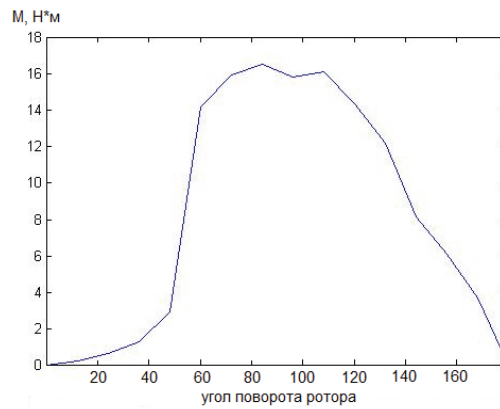
б/б

Рис. 2. Поперечное сечение исследуемого двигателя (а), зависимость момента от количества итераций (б)

Fig. 2. Cross-section of the investigated motor (а), time dependence of the number of iterations (б)



а/а



б/б

Рис. 3. Кривая электромагнитного момента до оптимизации (а) и после (б)

Fig. 3. Electromagnetic torque curve before optimization (а) and after (б)

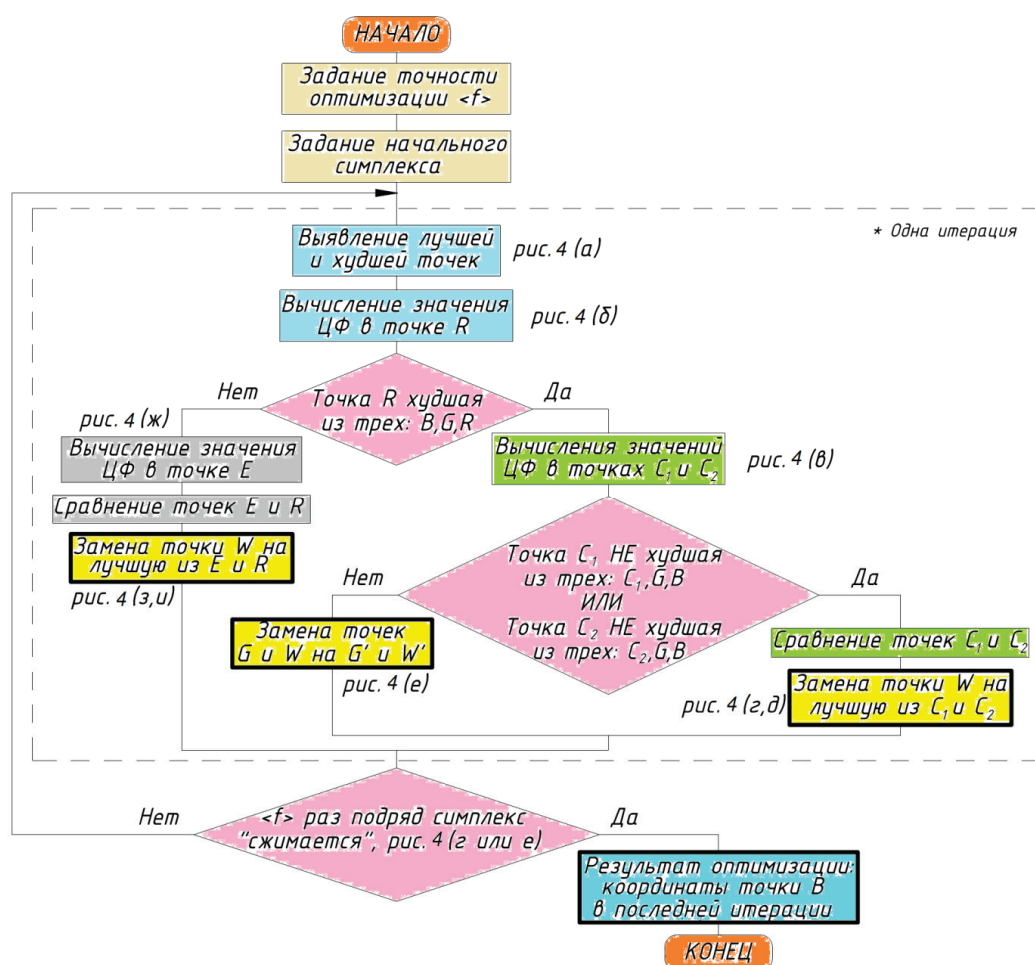


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации методом Нелдера-Мида

Fig. 4. Block diagram of the algorithm of optimization by the Nelder-Mead method

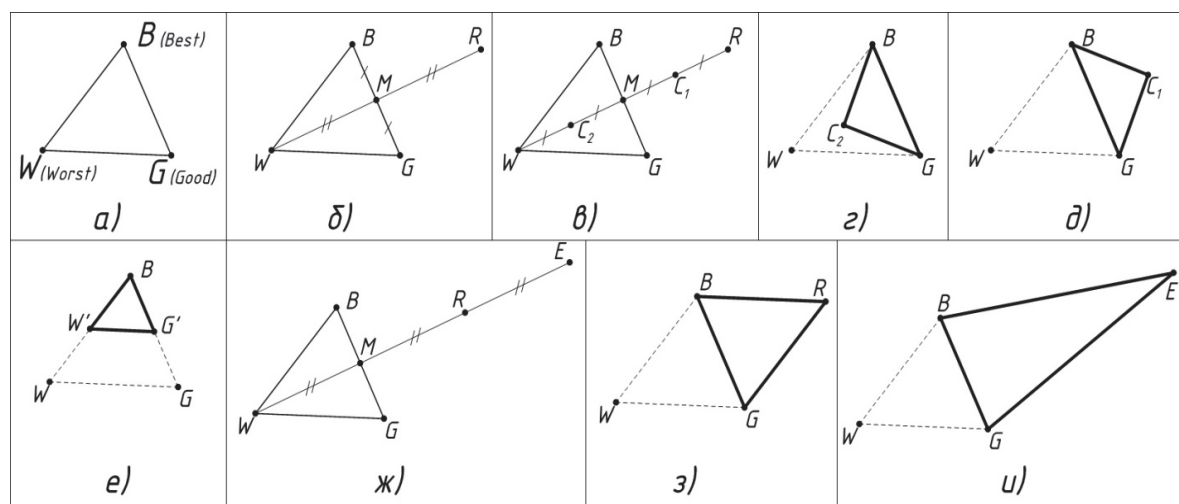


Рис. 5. Принцип нахождения оптимальной точки

Fig. 5. Principle of finding the optimum point

Таблица 2. Оптимизируемые параметры и результаты оптимизации

Table 2. Optimized parameters and optimization results

| Оптимизируемые параметры Optimized parameters | Исходные размеры, мм Original dimensions, mm | Оптимизиро- ванные размеры, мм Optimized dimensions, mm |
|--|--|---|
| Ширина коронки зубца ротора Width of rotor tooth crown | 17,3 | 21,37 |
| Ширина основания зубца ротора Width of rotor tooth base | 21,63 | 22,44 |
| Ширина зубца статора Width of stator tooth | 18,2 | 22,11 |
| Радиус по пазам статора Radius of stator slots | 63,5 | 64,73 |
| Значение среднего момента, Н·м Value of the average torque, N·m | 7,4 | 8,55 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалетдинов Р.С. Повышение эффективности работы скважинных насосов путем применения вентильных погружных электродвигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 28 с.
2. Санталов А. Погружные вентильные электродвигатели / А. Санталов, О. Перельман, А. Рабинович, Е. Пошвин, С. Коселев, И. Хозянов // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – № 12. – С. 58–65.
3. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 19 с.
4. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 23–33. URL: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3.pdf> (дата обращения: 17.02.2016).
5. Тяговые электрические машины / Щербаков В.Г. и др. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 643 с.
6. Anwar M.N., Husain I. Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machines // IEEE Transactions on industry applications. – November/December, 2000. – V. 36. – № 6. – P. 1589–1597.
7. Петрушин А.Д., Илясова Е.Е. Оценка влияния неравномерности воздушного зазора на величину сил одностороннего притяжения ротора к статору вентильно-индукторной электрической машины // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозрождения. – 2011. – № 2. – С. 84–93.
8. Petrushin A., Tchavychalov M. Influence of sensorless control on the noise of switched reluctance motor drive // International Journal of Power Electronic and Drive Systems. – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 433–438.
9. Petrushin A., Tchavychalov M., Miroshnichenko E. The Switched reluctance electric machine with constructive asymmetry // International Journal of Power Electronics and Drive System. – 2015. – V. 6. – № 1. – P. 86–91.
10. Chuang Tzu-Shien. Acoustic noise reduction of a 6/4 SRM drive based on third harmonic real power cancellation and mutual coupling flux enhancement // Energy Conversion and Management. – 2010. – V. 51. – № 3. – P. 546–552.

Оптимизированные параметры, исходные размеры и полученные результаты представлены в табл. 2.

Выводы

1. Применение метода Нелдера–Мида в практике проектирования ВИД позволило существенно увеличить среднее значение электромагнитного момента. Так, до оптимизации значение среднего электромагнитного момента было равно 7,4 Н·м, после оптимизации – 8,55 Н·м, что составило увеличение на 15,5 %.
2. В случае, когда не требуется увеличение мощности или момента, оптимизация активной части ВИД позволит уменьшить массу материалов (соответственно и габариты), что сократит расходы на производство [28].

11. Bösing M. Acoustic modeling of electrical drives. Noises and vibration synthesis based on force response superposition: Diss. – Aachen, 2013. – 208 p.
12. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2012. – 767 с.
13. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2006. – 430 с.
14. Голландцев Ю.А. Уравнения вентильного индукторно-реактивного двигателя при одиночной коммутации фаз // Электротехника. – 2003. – № 7/03. – С. 45–51.
15. Miller T.J.E. Optimal design of switched reluctance motors // IEEE Transactions on industrial electronics. – February, 2002. – V. 49. – № 1. – P. 15–27.
16. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications. – Virginia: the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. – 416 p.
17. Low T., Lin H., Chen S. An Approach to Design and Simulation of Fraction – Horse Power (FHP) Switched Reluctance Drive // Proc. ICEM-94, D.7 Machines. – Virginia, 2013. – V. 4. – P. 145–150.
18. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.
19. Кузнецов В.А., Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
20. Optimization of energy conversion loop in switched reluctance motor for efficiency improvement / L. Jian, Q. Ronghai, C. Zhichu, C. Yun-Hyun // J. Electr. Eng. Technol. – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 565–571.
21. Шевкунова А.В. К вопросу о проектировании вентильно-индукторного двигателя // Труды РГУПС. – 2015. – № 2 (31). – С. 117–121.
22. Проектирование вентильных индукторных двигателей. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 56 с.
23. Численные методы. Использование MATLAB: пер. с англ. / под ред. Ю.В. Козаченко. – 3-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
24. Горшков Ю.Е. Краткий анализ и выбор метода оптимизации параметров дугогасительной камеры автоматических выключателей // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – 8 с. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11830> (дата обращения: 15.02.2016).
25. Arora J.S. Global optimization concepts and methods // Introduction to optimum design (Fourth edition). – 2016. – P. 707–738.

- URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008065000160>
26. Ganji B., Heidarian M., Faiz J. Modeling and analysis of switched reluctance generator using finite element method // Original research article. Ain shams engineering journal. – 2015. – V. 6. – № 1. – P. 85–93.
27. Петрушин А.Д., Шевкунова А.В., Кашуба А.В. Оптимизация геометрии зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя //
- Вестник ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – № 1 (10). – С. 27–31.
28. Петрушин А.Д., Шевкунова А.В. Экономический эффект от оптимизации геометрии активной части вентильно-индукторного двигателя // Труды РГУПС. – 2015. – № 3 (32). – С. 117–121.

Поступила 20.03.2016 г.

Информация об авторах

Петрушин А.Д., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрического подвижного состава Ростовского государственного университета путей сообщения.

Шевкунова А.В., аспирант кафедры электрического подвижного состава Ростовского государственного университета путей сообщения.

Кашуба А.В., студент кафедры электрического подвижного состава Ростовского государственного университета путей сообщения.

UDC 621.363 + 06

OPTIMIZATION OF THE SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR ACTIVE PART BY THE NELDER-MEAD METHOD

Alexander D. Petrushin¹,
alex331685@yandex.ru

Anastasiya V. Shevkunova¹,
nastya3051990@mail.ru

Alexander V. Kashuba¹,
kashuba-av@mail.ru

¹ Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya square, Rostov-on-Don, 344038, Russia.

The relevance of the work relates to the important practical problems for oil industry, such as improving the efficiency of oil extraction, the reliability of equipment and reduction of operating costs. In this regard, the paper considers the issues of optimization of active part of the switched-reluctance motor, which has several advantages compared to asynchronous motors and synchronous with permanent magnets which are applied in oil industry. The main advantages of the switched-reluctance motor are efficiency and reliability. For further improvement of its specific indicators and economic efficiency the authors have applied the Nelder–Mead method, which allows in the given dimensions increasing the electromagnetic torque of the motor by optimizing the geometry of the active part. It is important for a submersible pump having strict size constraints. At directed drilling of a well with high curvature the application of the motor of this type allows implementing fully its advantages.

The main aim of the study is to analyze the basic design techniques for the switched-reluctance drives and to optimize the active part of the switched-reluctance motor for increasing the average value of the electromagnetic torque.

The methods used in the study. Magnetic field was calculated by the finite element method, embedded in the program for calculating and visualizing the electromagnetic processes FEMM 4.2; the area under the curve of the electromagnetic torque was calculated by numerical integration of this curve by the method of trapezoids. The authors used the deterministic Nelder–Mead method (simplex), which relates to the methods of unconditional optimization of functions of several variables and does not use the derivative (gradient) function.

The results. The authors analyzed the basic methods of designing the switched-reluctance drive and developed the software of automated design of the switched-reluctance motor in MATLAB environment. This software help form the geometrical figures of tooth area of the motor. The magnetic field was calculated in the program FEMM 4.2. The authors implemented the optimization algorithm for calculating the average value of the electromagnetic torque based on the Nelder–Mead method (deformable polyhedron). It allows improving significantly the switched-reluctance motor performance.

Key words:

Switched-reluctance motor, design, stator, rotor, tooth area, electromagnetic torque, optimization, Nelder–Mead method.

REFERENCES

1. Kamaletdinov R.S. *Povyshenie ehffektivnosti raboty skvazhinykh nasosov putem primeneniya ventilnykh pogruzhnykh ehlektrodvigatelye*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of submersible pumps by application of valve submersible motors. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2007. 28 p.
2. Santalov A., Perelman O., Rabinovich A., Poshvin E., Koshelev S., Khotsyanov I. *Pogruzhnye ventilnye ehlektrodvigateli* [Submersible brushless motors]. *Neftegazovaya vertikal*, 2011, no. 12, pp. 58–65.
3. Sipaylov V.A. *Optimizatsiya rezhimov raboty ustanovok ehlektrosentrobezhnykh nasosov mekhanizirovannoy dobychi nefi*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Optimization of operation modes of electric mechanical oil pumps installations. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 19 p.
4. Ptakh G.K. *Ventilno-induktorny reaktivny ehlektroprivod sredney i bolshoy moshchnosti: zarubezhny i otechestvenny opyt* [Switched reluctance electric drive jet medium and high power: foreign and domestic experience]. *Electrical engineering: network electronic scientific journal*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33. Available at: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3.pdf> (accessed 17 February 2016).
5. Shcherbakov V.G., Petrushin A.D. *Tyagovye elektricheskie mashiny* [Traction electrical machines]. Moscow, Educational and methodical center by training on railway transport, 2015. 643 p.
6. Anwar M.N. Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machines. *IEEE Transactions on industry applications*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 1589–1597.
7. Petrushin A.D., Ilyasova E.E. Evaluation of air gap non-uniformity impact on the magnitude of unilateral forces of attraction of rotor to stator of switched reluctance electric machine. *Vestnik VELNII*, 2011, no. 2, pp. 84–93. In Rus.
8. Petrushin A., Tchavychalov M. Influence of sensorless control on the noise of switched reluctance motor drive. *International Journal of Power Electronic and Drive Systems*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 433–438.
9. Petrushin A., Tchavychalov M., Miroshnichenko E. The Switched reluctance electric machine with constructive asymmetry. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 86–91.
10. Chuang Tzu-Shien. Acoustic noise reduction of a 6/4 SRM drive based on third harmonic real power cancellation and mutual coupling flux enhancement. *Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 546–552.
11. Bösing M. *Acoustic modeling of electrical drives. Noises and vibration synthesis based on force response superposition*. Diss. Aachen, 2013. 208 p.
12. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ., 2012. 767 p.
13. Goldberg O.D. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Higher school Publ., 2006. 430 p.

14. Gollantsev Yu.A. Uravneniya ventilnogo induktorno-reaktivno-go dvigatelya pri odinochnoy kommutatsii faz [Equation of switched reluctance jet engine with single switching phases]. *Electrical technology*, 2003, no. 7/03, pp. 45–51.
15. Miller T.J.E. Optimal design of switched reluctance motors. *IEEE Transactions on industrial electronics*, February, 2002, vol. 49, no. 1, pp. 15–27.
16. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications*. Virginia, the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. 416 p.
17. Low T. An Approach to Design and Simulation of Fraction – Horse Power (FHP) Switched Reluctance Drive. *Proc. ICEM-94, D.7 Machines*, 2013, vol. 4, pp. 145–150.
18. Bychkov M.G. Ehlementy teorii ventilno-induktornogo elektroprivoda [Elements of the theory of switched reluctance electric drive]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 8, pp. 35–44.
19. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* [Switched reluctance motors]. Moscow, Moscow power engineering Institute Publ., 2003. 70 p.
20. Jian L., Ronghai Q., Zhichu C., Yun-Hyun C. Optimization of energy conversion loop in switched reluctance motor for efficiency improvement. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 565–571.
21. Shevkunova A.V. On the issue of designing switched-reluctance motor. *Proceedings of Rostov State Transport University*, 2015, no. 2 (31), pp. 117–121. In Rus.
22. *Proektirovanie ventilnykh induktornykh dvigateley* [Design of switched-reluctance motors]. Moscow, Moscow power engineering Institute Publ., 2005. 56 p.
23. Kozachenko Yu.V. *Chislennye metody. Ispolzovanie MATLAB* [Numerical methods. Using MATLAB]. Moscow, Williams Publ., 2001. 720 p.
24. Gorshkov Yu.E. Brief analysis and choice of the method for optimizing the parameters of arcing chamber in circuit breakers. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 1, 8 p. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11830> (accessed 15 February 2016). In Rus.
29. Arora J.S. Global optimization concepts and methods. *Introduction to optimum design* (Fourth edition), 2016, pp. 707–738. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008065000160>
30. Ganji B., Heidarian M., Faiz J. Modeling and analysis of switched reluctance generator using finite element method. *Original research article. Ain shams engineering journal*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 85–93.
31. Petrushin A.D., Shevkunova A.V., Kashuba A.V. Optimizatsiya geometrii zubtsovoy zony ventilno-induktornogo dvigatelya [Optimization of the geometry of tooth area of switched-reluctance motor]. *Bulletin of the state marine University named after Admiral F.F. Ushakov*, 2015, no. 1 (10), pp. 27–31.
32. Petrushin A.D., Shevkunova A.V. Economic effect of optimizing geometry of the active part of the switched-reluctance motor. *Proceedings of Rostov State Transport University*, 2015, no. 3 (32), pp. 117–121. In Rus.

Received: 20 March 2016.

Information about the authors

Alexander D. Petrushin, Dr. Sc., professor, Head of the department, Rostov State Transport University.

Anastasiya V. Shevkunova, postgraduate student, Rostov State Transport University.

Alexander V. Kashuba, student, Rostov State Transport University.